



INTRODUCCIÓN A LA PROPULSIÓN AEROESPACIAL

Ingeniería aeroespacial.....	1
Movilidad.....	2
Energía.....	3
Combustión.....	4
Polución.....	6
Propulsión aeroespacial.....	7
Tipos de motor.....	9
Adónde va la energía propulsiva.....	10

INGENIERÍA AEROESPACIAL

Despegarse del suelo, subir, volar... ir más rápido y más lejos; eso quiere la [ingeniería aeroespacial](#) (IA). La vida requiere de nosotros hacer cosas, más que saber cosas, y el camino más corto para saber hacer es aprender de lo que ya se sabe hacer. No hemos conseguido el grácil y silencioso vuelo de las aves, ni sabemos parar el vuelo en una rama de un árbol, pero hemos conseguido que volar a casi 1000 km/h sea accesible a todo el mundo (la aviación transporta unos $4 \cdot 10^9$ pax/año), y que haya media docena de personas casi permanentemente en órbita a 400 km de altura, y que algunos hombres hayan visitado nuestra luna (casi a 400 000 km de distancia).

Para conseguir que vuele una mole de 500 toneladas con más de 500 personas dentro (e.g. el [A380](#) puede despegar con $m_{\max}=575$ t y 800 pasajeros), o para conseguir inyectar en órbita baja un satélite que ha de circular a 7,8 km/s, hace falta saber mucho de Propulsión, Aerodinámica, Materiales, Estructuras, Electrónica... y Control para conseguir mantener el rumbo pese a las perturbaciones atmosféricas. Aquí nos centraremos en la propulsión (forzar el avance).

Se pueden distinguir tres tipos de vuelo:

- [Vuelo aerostático](#), donde el peso a elevar, $W=mg$, se contrarresta con la flotabilidad de una nave menos pesada que el aire, i.e. con la fuerza de Arquímedes, $F_{\text{Arq}}=\rho_a Vg > W$. Esta técnica se domina desde los primeros ascensos en globo, en Parí en [1783](#) (1° con globo de aire caliente, de los Montgolfière, y 2° diez días después con globo de hidrógeno abierto por abajo, por el Prof. Charles). Hoy día la mayoría de estos aerostatos usan helio. Una de las aplicaciones novedosas de los aerostatos puede ser el uso de dirigibles (propulsados) que sobrevuelen permanentemente áreas de interés (para telecomunicaciones o vigilancia), a una altitud de $z=20..25$ km, alimentados por energía solar fotovoltaica y baterías. A esa altitud los vientos son moderados y no sería difícil mantener la posición, pero hay que resolver problemas de control térmico asociados a la flotabilidad (además de los asociados al funcionamiento de los equipos): la temperatura ambiente y la del gas interior es de unos 215 K, y hay que evitar el calentamiento solar diurno y el enfriamiento nocturno.
- [Vuelo aerodinámico](#), donde el peso se contrarresta con la sustentación o fuerza lateral, L , que originan las alas al avanzar, empujadas horizontalmente por los motores (“le dijo el ala al motor: tú empuja que yo te subo”). La aviación empezó en [1903](#) con un biplano con motor de gasolina. Para

que haya vuelo sin motor (planeo), es necesario que el avión vaya bajando o que el aire vaya subiendo (térmicas); el balance de fuerzas longitudinal es $ma=F-D+W\sin\gamma$, siendo F la fuerza de empuje longitudinal del motor, D la resistencia al avance, y γ el ángulo de planeo; en crucero, $F=D$ y $L=W$. La gran ventaja de este tipo de vuelo es su eficiencia aerodinámica, $L/D=W/F\sim 20$, i.e. las alas pueden levantar un peso unas 20 veces mayor que la fuerza de empuje del motor (e.g. entre los 4 motores del A380 solo tienen que empujar con unos $F=300$ kN para mantener en vuelo de crucero un peso de unos $W=mg=5000$ kN ($W/F=5000/300=17$; nótese que en el despegue esos motores dan un empuje total de 1400 kN, necesario no solo para sustentar un máximo de 575 t sino para darle aceleración y ganar altura).

- **Vuelo impulsivo**, donde el peso se contrarresta con el empuje vertical de un motor cohete. Este tipo de vuelo suele llamarse **balístico** porque es parecido al de los proyectiles, y así resulta más apropiado para describir movimientos orbitales, en los que, como en las balas, no hay empuje ni **impulso**, pero aquí tratábamos de ‘despegar del suelo’ de manera controlada, y no como cuando a un objeto se le da una patada o se lanza con la mano (o con una honda, o con una explosión). Una persona no puede soportar las aceleraciones necesarias para despegar como una bala, y el cohete que puso en órbita a Gagarin en 1961 estuvo impulsando la nave durante **más de diez minutos**, como en todos los lanzamientos desde entonces.

MOVILIDAD

La ingeniería aeroespacial (IA) trata de permitir y facilitar el transporte aéreo y espacial, principalmente de personas, que es la carga más delicada. Por eso los inicios de los vuelos arriba mencionados (1783, 1903, 1961) se refieren a vuelos tripulados.

La movilidad es una necesidad humana, material y espiritual (Francis Bacon lo recomendaba para adquirir conocimiento, ya en 1625), pero tiene un coste que no siempre corresponde al precio del billete de transporte. En primer lugar, y como toda actividad humana, es peligrosa, y como la peligrosidad aumenta con la potencia de las herramientas que usamos, la mayoría de los accidentes aeroespaciales son fatales. Bien es verdad que por km·pax (kilómetro×pasajero) el avión es el medio de transporte más seguro (no en hora·pax, y las personas tienen tasado el tiempo de vida, no el kilometraje). Además está el riesgo de coger o transmitir una enfermedad a la que no estamos preparados (la respuesta inmediata a la pandemia **covid-19** fue la inmovilización de la población). En segundo lugar, viajar consume recursos naturales, y contamina el ambiente; no hay recursos ambientales suficientes para que tanta gente viaje tanto. El transporte da trabajo a muchas personas, pero ¿es necesario ir a las antípodas a tomar unas fotos que están en Internet con más calidad (y en condiciones meteorológicas óptimas)? Aunque el sushi en Japón sea inigualable ¿es razonable viajar cientos o miles de kilómetros por una buena comida?

Ciñéndonos solo al consumo de recursos naturales, y en concreto al combustible y sus efectos nocivos, cabe apuntar que la propulsión aeroespacial es una gran consumidora de fuel. Si un coche en carretera puede consumir unos 3 g/s de fuel (unos 10 kg/h), cada motor de un gran avión comercial consume al despegue unos 5 kg/s, el cohete Ariane 5 unas 4 t/s, y el Saturno V consumía 15 t/s. No importaría este último consumo si fuera para que la humanidad se apropiase de la luna, i.e. la hiciera más suya, más conocida; pero no parece lógico que todos vayamos a la luna para poder decir ‘**yo he estado allí**’. Es verdad que el

Introducción a la propulsión aeroespacial

consumo de combustible de un avión lleno de pasajeros, en km·pax, es similar al de un automóvil, pero eso no es exigente: ¿Qué está pasando con la movilidad urbana?, pues que las emisiones de los motores de combustión causan muchísimas muertes prematuras, contribuyen a los cambios climáticos que estamos sufriendo, y ya no hay más sitio para aparcar cada uno su vehículo. Sin embargo, ¡es tan cómodo el coche privado!: ir cuando quieras, adonde quieras, y con quien quieras. La movilidad es una necesidad humana, pero habrá que ir disminuyendo sus inconvenientes, y ello requiere conocer la realidad actual, la historia, y las previsiones.

Volviendo al consumo de combustible, lo que hay que analizar es la función propulsiva del fuel y las alternativas posibles, i.e. las fuentes de energía para la propulsión, y la eficiencia de los motores usados para propulsar (nótese el paralelismo con la obra magna de la Termodinámica: “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”, de Léonard Sadi Carnot, 1824).

En principio, para moverse de A a B no sería necesario gastar energía si A y B están al mismo nivel y el movimiento es suave (con escasa disipación); pero nadie compraría un coche para ir a 1 km/h aunque no consumiese nada. Queremos ir rápido, desplazando el aire o el agua que nos rodea, y eso consume energía y por eso hay que rellenar el depósito: la combustión del fuel con el aire libera mucha energía química, que pasa (una parte) a energía mecánica para acelerar el vehículo, que empuja y aparta el aire circundante, el cual recibe una parte de esa energía mecánica que acaba disipándose en su seno por viscosidad, lo que junto a la disipación por fricción en las ruedas y todos los mecanismos interiores, y la disipación térmica por el escape caliente, hace que toda la energía usada en la propulsión de A a B acabe disipándose en el ambiente. Vemos la gran variedad de procesos energéticos.

ENERGÍA

La [energía](#) es una magnitud física escalar que, en la evolución de un sistema aislado, se conserva en su conjunto (1^{er} Principio), pero con el tiempo tiende a distribuirse adecuadamente (2^o Principio). Cuando se considera la interacción de un sistema no aislado (con algún otro, e.g. con su entorno), aparecen muchos efectos energéticos del mayor interés: la energía del sistema puede hacer trabajo que puede usarse para mover máquinas y para propulsar; puede emitir calor que puede usarse para combatir el frío y para cocinar; puede emitir radiación visible para iluminarnos... Con la energía se hacen maravillas, como poder comunicarse en directo con otra persona en las antípodas (hablándose, viéndose, enviándose documentos, video en tiempo real...), sin tener que desplazarse. Se podría decir que la energía es la vida. Los antiguos griegos decían que todo estaba formado por la combinación de cuatro elementos primordiales: tierra, agua, aire, y fuego. Este último es la luz, la energía, la vida (y la muerte, accidental o con armas de fuego).

La crisis energética actual no es que falta energía, sino que no sabemos utilizar adecuadamente los recursos energéticos naturales (e.g. nos resulta más factible ir a pelear allende los mares por un líquido negro, sucio y pringoso, que usar la energía solar, mucho mejor repartida). Pasa como con el agua: hay energía (y agua) de sobra para todos en la Tierra, pero no sabemos bien cómo aprovechar los recursos naturales (variables espacio-temporalmente), para satisfacer nuestras necesidades aquí y ahora. Y al igual que se puede morir

de sed en medio del mar, se puede morir de falta de energía en medio del ardiente desierto, y tanto una riada como un fuego pueden causar grandes catástrofes.

Para dar una idea de las proporciones, del total de recursos energéticos directamente usados por el hombre (i.e. energía primaria mundial, sin contar el aprovechamiento indirecto de energía solar en agricultura ni en acondicionamiento térmico pasivo), aproximadamente el 40 % es usado para generar electricidad (la mayor parte por combustión de carbón), un 30 % es usado para calefacción (mayormente por combustión de gas natural en sociedades industrializadas), y casi otro 30 % es usado en el transporte de personas y mercancías (casi todo basado en combustibles derivados del petróleo). La cantidad global de esa [energía primaria](#), 630 EJ/a (630 exajulios/año), suele especificarse de muy diversas maneras equivalentes: 175 000 TWh (teravatios·hora/año), 15,6 Gtoe/a (gigatoneladas/año de petróleo o equivalente), 4330 bbl/s (barriles de petróleo por segundo), 21 TW (teravatios) de media, o 2800 W/p de media (i.e. 2800 vatios por persona, que debe ser comparado con los 100 W/p típicos del consumo metabólico personal que nos permitir estar vivos, pensar, andar...). De toda esa energía primaria, solo utilizamos como energía final (electricidad y combustibles refinados) un 70 % o así, disipándose el otro 30 % al ambiente en los procesos de conversión de energía (en generar electricidad a partir de combustibles, mayormente). Estos porcentajes varían grandemente a nivel regional y local, pero en el contexto actual de gran movilidad de ideas y personas, no parece razonable pensar solo en nuestro entorno inmediato (las fronteras son cada vez más permeables).

Se habrá notado en la descripción anterior del consumo de energía primaria que casi toda proviene de la combustión de combustibles fósiles (con aire, hay que insistir en ello): de los 630 EJ/a de energía primaria consumidos en 2018, el 81 % proviene de fósiles (carbón, petróleo, y gas), el 14 % de recursos renovables (mayoritariamente por combustión de biomasa, seguido de la hidráulica, y de la eólica en menor grado), y un 5 % de la fisión del uranio en centrales nucleares. Carbón, gas y petróleo son también el origen del 65 % de la [electricidad generada en 2018](#), que fue de 93 EJ/a (25 000 TWh/a, 420 W/p en promedio). Y este consumo de fósiles acarrea dos graves problemas ambientales: la contaminación química local, y la global.

En resumen, son muchos los servicios energéticos que nos facilitan la vida: iluminación artificial, calefacción, cocción de alimentos, obtención de materiales (el acero consume 20..30 MJ/kg, y el aluminio 60..80 MJ/kg), construcción de viviendas e infraestructuras, transporte, refrigeración y aire acondicionado, informática y telecomunicaciones... Pero estos servicios llevan asociados riesgos que hay que minimizar, y tener presente otras necesidades humanas además de la energía, como el acceso a un aire respirable, a un agua potable, a una comida saludable, a la estima propia y ajena...

Combustión

La [combustión](#) es una reacción química de oxidación-reducción ([redox](#)) fuertemente exotérmica autopropagada, i.e. una transferencia de electrones de unos átomos a otros con liberación de tanta energía química (de los enlaces) a energía térmica (agitación microscópica tan grande como para emitir luz), que el proceso se difunde sin decaer (la masa que arde inflama a la adyacente) hasta agotarse algún reactivo o sufrir una perturbación que lo extinga.

Pensemos en la combustión del hidrógeno con el oxígeno. En condiciones normales, ambos son gases diatómicos muy estables: se necesitan 436 kJ/mol para separar los dos átomos de la molécula H_2 ($H_2 \rightarrow 2H$, por eso la [entalpía de formación](#) del H es 218 kJ/mol), y 498 kJ/mol para separar el $O_2 \rightarrow 2O$. Pero la molécula de agua que forman al reaccionar (lo cual se consigue aportando apenas un milijulio con un pequeño chispazo) es mucho más estable, pues se necesitan 492 kJ/mol para separar cada uno de los dos átomos de H del átomo de O; el balance energético de la reacción $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$ es que, por mol de agua formada (o de hidrógeno reactante), se gastan 218 kJ para romper los enlaces del H_2 , más $\frac{1}{2}498 = 249$ kJ para romper los enlaces del O_2 , pero se liberan $2 \cdot 492 = 984$ kJ al formarse la de H_2O , con un resultado neto de liberación de $984 - 436 - 249 = 299$ kJ, que es acorde con el valor experimental de la [entalpía de formación](#) del agua, $h_f = -286$ kJ/mol (el signo menos indica liberación de energía, y la diferencia numérica es debida a haber considerado solo los enlaces OH en el agua).

Conviene resaltar que se puede realizar la misma reacción global (i.e. $H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O + 286$ kJ/mol) sin combustión (i.e. sin embalamiento ni producción de altas temperaturas). En una pila de combustible, se mantienen separados por un electrolito el H_2 y el O_2 , con electrodos en las interfases, descomponiéndose el H_2 en protones y electrones ($H_2 = 2H^+ + 2e^-$) a medida que se van extrayendo los electrones a través de un circuito eléctrico convencional y van pasando los protones a través de un electrolito para contactar con el O_2 y cerrar el circuito eléctrico con la reacción $2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$, liberándose la mayor parte de los 286 kJ/mol como energía eléctrica y solo una pequeña parte como calor (en el límite, 237 kJ/mol de trabajo eléctrico y 49 kJ/mol de calor). Y algo parecido tiene lugar en el metabolismo de los seres vivos. La respiración celular aerobia es básicamente la oxidación de la glucosa con oxígeno en las [mitocondrias](#) (ambos reactivos aportados por el flujo sanguíneo): $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + 2880$ kJ/mol, el proceso inverso de la [fotosíntesis](#). Los seres vivos almacenan el alimento sólido (basta con comer unas pocas veces al día), pero no pueden almacenar el oxidante gaseoso, así que tenemos que estar respirando incluso dormidos. Nótese que el alimento sirve no solo como fuente de energía sino como fuente de materia para el crecimiento.

En resumen, la misma reacción global glucosa/aire, con la misma liberación de energía y la producción de los mismos desechos, puede llevarse a cabo a través de intermediarios químicos como el ATP y el ADP en el metabolismo animal, o a través de intermediarios iónicos como el H^+ y el e^- en la pila antes detallada, o directamente por colisiones atómico-moleculares entre los reactivos, que es la combustión (realmente es por colisiones de partículas intermedias muy energéticas, los radicales libres, que son los que van propagando la reacción en el frente de llama). Bueno, puede ocurrir también que el contacto directo no se dispare como en la combustión, sino que progrese muy lentamente, como en la oxidación del hierro en el aire, $Fe + \frac{3}{4}O_2 = \frac{1}{2}Fe_2O_3$, que puede tardar años en avanzar a través de un trozo grande de metal (o puede ser explosiva si el metal está en polvo).

Y conviene no olvidar que la combustión en sí no es ni buena ni mala, sino que depende del uso que de ella se haga: la combustión ha sido la luz que ha iluminado el progreso humano (hasta el siglo XIX toda la iluminación artificial era por combustión), pero la combustión en los motores alternativos y en las calefacciones está haciendo irrespirable el aire en las grandes ciudades.

Polución

No se puede vivir sin apropiarnos de recursos naturales, ni sin evacuar al ambiente los productos de desecho; vivimos a expensas del entorno. En el caso extremo, podríamos reprocesar todas las sustancias de desecho y volverlas a su estado natural, pero aun así se necesitaría una fuente de energía de mayor nivel que el sumidero de energía correspondiente. Ya estamos aprendiendo a realizar esto en las naves espaciales: en la [ISS](#) se reciclan con energía solar todos los gases y los líquidos del metabolismo humano, pero todavía falta mucho para reciclar los sólidos. La Tierra en su conjunto ha sido hasta ahora el único sistema capaz de reprocesar toda la materia a partir únicamente de la energía solar (las energías no solares son minoritarias: la mareomotriz y la geotérmica). A partir de la energía radiante que le llega del Sol (a 5800 K), y evacuando la misma cantidad de energía por radiación térmica hacia el fondo del Universo (a 2,7 K), la Tierra es capaz de mantener todos los [ciclos vitales](#) en su superficie: el ciclo del agua, el del carbono, el del nitrógeno, etc. El Sol no sólo permite una vida cálida e iluminada en la Tierra; también produce toda la comida (fotosíntesis) y la bebida (ciclo hidrológico), y hasta el oxígeno del aire que respiramos (también en la fotosíntesis; este O₂ proviene de la [hidrólisis del agua](#) y no del CO₂).

Pero la actividad humana está introduciendo cambios en el medioambiente a nivel planetario, principalmente asociados al uso de la energía, y en particular de los procesos de combustión con combustibles fósiles. Dejando aparte el hecho de que estos fósiles son no renovables y acabarán extinguiéndose, y sin entrar en el impacto ambiental asociado a su extracción y transporte, los efectos nocivos de su combustión pueden agruparse en:

- Contaminación química local (de siempre conocida), debida a una mala combustión, con emisión de humos, otras partículas invisibles al ojo humano (las menores de 2,5 μm son muy dañinas porque penetran en los pulmones pasando los filtros naturales), el óxido de carbono que producía la llamada ‘muerte dulce’, los compuestos orgánicos volátiles malolientes que todos reconocemos en los gases de escape, y los óxidos de nitrógeno formados por quemar con aire y a alta temperatura. Esta polución local puede ser expandida a escala regional por las corrientes ambientales de aire y agua (si el tiempo de residencia es grande), como ocurre con las emisiones de óxidos de carbono y de nitrógeno, que dan lugar a lluvias ácidas en regiones y países vecinos, perjudiciales para la flora, la fauna, y el patrimonio.
- Contaminación global, debida a la combustión (aunque ésta fuera perfecta) de fósiles que a la Naturaleza le ha llevado millones de años almacenarlos y ahora nosotros los estamos quemando en un par de siglos. Si una biomasa que se ha formado en unos pocos meses o años a partir de la fotosíntesis, e.g. $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + h\nu = \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$, siendo $h\nu$ la energía solar, se quema bien con aire, $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + E$, donde ahora E es la energía liberada (trabajo y calor), el resultado global es que hemos transformado energía solar (pasiva para nosotros) en energía útil (activa, para nosotros). Pero si la biomasa no era ‘viva’ (bio) sino ‘enterrada, muerta’ (fósil), en su combustión (aun siendo perfecta) estamos añadiendo H₂O y CO₂ al ambiente, sin contrapartida actual. De momento el agua que añadimos a la atmósfera por la combustión de los fósiles, aunque es mucha (unas 15 Gt/a), no parece tener efectos perniciosos para el equilibrio natural ([ciclo del agua](#)), aunque casualmente la aviación es el sector más preocupante porque las emisiones de vapor de agua a gran altura (>5 km) generan a veces grandes [cirros](#) por propagación en atmósferas frías y húmedas de las

típicas estelas de condensación, [contrails](#), de los aviones turbopropulsados, lo que contribuyen a aumentar el efecto invernadero terrestre casi tanto como las emisiones de CO₂ de los aviones (en 2019 la aviación aporta más del 4 % del forzamiento radiativo antropogénico global: 2,5 % por emisiones de CO₂, y casi otro 2% por [contrails](#)).

Es el CO₂ emitido a nivel global en la combustión de los fósiles lo que está contribuyendo decisivamente al incremento del efecto invernadero que es el origen de los dañinos cambios climáticos que estamos padeciendo ya. En 2018 estábamos emitiendo unas 40 Gt/a de CO₂ (incluyendo la pequeña contribución de otros gases de efecto invernadero como CO₂ equivalente); de esa cantidad, un 30 % ocurren en las centrales térmicas de electricidad, un 25 % en los vehículos de transporte, un 20 % en la industria, un 15 % en la agricultura, y un 10 % en el ámbito doméstico. Del 25 % de emisiones globales de CO₂ atribuidas al transporte, serían 15 por transporte de pasajeros y 10 por transporte de mercancías, y, de los 15 por pasajeros, serían 7 por coches en las ciudades, 5,5 interurbano por carretera, ferrocarril, o barco, y 2,5 por aviación. Del transporte de mercancías, dos tercios serían terrestres y un tercio marítimo, con una insignificante participación aérea a escala global.

La concentración media de CO₂ en la atmósfera, que durante el último millón de años se mantenía en unas [250 ppm](#) molar (unas 2000 Gt de CO₂ en toda la atmósfera), en los dos últimos siglos (Revolución Industrial) ha subido a [413 ppm](#) y sigue subiendo. El cambio climático que el incremento de efecto invernadero por estas emisiones está causando, es tan amenazador, que parece que ya no es aceptable dejar de emitir más CO₂, sino que tendremos que descarbonizar la atmósfera hasta niveles menos dañinos, lo que resultará más asequible que modificar el poblamiento humano (e.g. abandonar las ciudades costeras en las zonas intertropicales, abandonar las regiones semidesérticas...).

En resumen, la mayor parte de la energía que usamos hoy a escala global se obtiene de la combustión de combustibles fósiles con el aire ambiente. En particular, en el sector del transporte, la mayor parte de la energía usada para la propulsión proviene de combustibles líquidos derivados del petróleo (gasolina, diésel, y keroseno), que hay que llevar embarcados, quemados con el aire ambiente que se va tomando in situ, a medida que se va necesitando. Para poder prescindir de los fósiles, se podría ir hacia combustibles similares obtenidos de la biomasa o sintetizados a partir del agua y el aire (electrólisis, termólisis, fotosíntesis artificial), o a realizar las reacciones de óxido-reducción de manera más controlada (en grandes acumuladores electroquímicos, o en pequeñas pilas de combustible), o a pasar a reacciones nucleares mucho más energéticas (y por tanto mucho más peligrosas).

PROPULSIÓN AEROESPACIAL

Empujar algo para que se mueva en el aire o en el vacío; eso es la propulsión aeroespacial. No solo empujar, y no solo moverse, porque se puede empujar y no moverse (un motor frenado empuja, pero no propulsa, como cuando empujamos contra una pared), y se puede mover sin empujar (todos los proyectiles y vehículos espaciales cuando van sin motor). El rendimiento de la propulsión, $\eta = Fv/\dot{E}$, es el producto del empuje F por la velocidad de vuelo v (i.e. la potencia propulsante), dividido por la potencia de la fuente de energía primaria usada (normalmente el consumo de combustible por su poder calorífico, $\dot{E} = \dot{m}_f h_{PC}$). Por afinidad, se incluye en la propulsión aeroespacial el vuelo a punto fijo de helicópteros y [VTOL](#), aunque el

Introducción a la propulsión aeroespacial

rendimiento propulsivo a punto fijo sea nulo (el vehículo no se mueve), y el vuelo orbital balístico (las trayectorias espaciales sin propulsión).

Un sistema aislado no puede propulsarse; necesita apoyarse en un segundo sistema, que puede ser con las ruedas en la tierra, con hélices en el aire o el agua, o eyectando masa propia, aunque se comprende que este último modo de propulsión resulta mucho más oneroso. El sistema propulsivo de un vehículo se puede dividir en tres partes, el propulsor propiamente dicho, P (Fig. 1), la fuente de energía que lo alimenta, E, y el motor, M, que convierte la energía de la fuente en la energía que utiliza el propulsor.

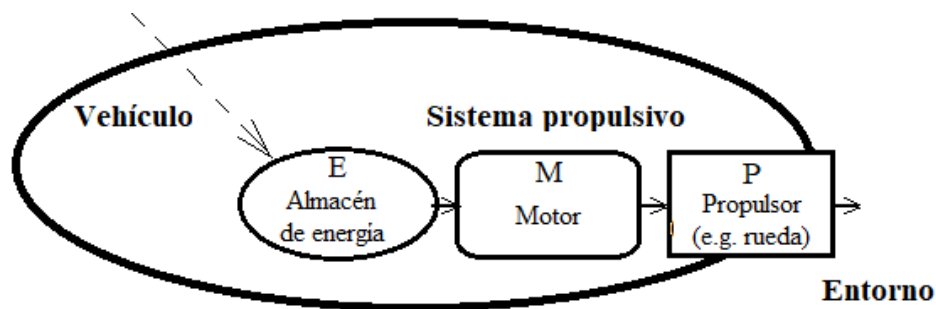


Fig. 1. Elementos del sistema propulsivo de un vehículo, y flujos de la energía.

La fuente de energía, E, es generalmente transportada en el mismo vehículo, aunque podría recibirse de algún sistema externo mediante cables como los trenes eléctricos, o mediante radiación como los vehículos alimentados por energía solar, pero aun así estos suelen llevar un depósito de energía para acoplar la oferta a la demanda. Esta fuente de energía debe proporcionar no solo las necesidades propulsivas sino también las necesidades de acondicionamiento ambiental (e.g. calefacción, iluminación), telecomunicaciones, etc. Por esta razón suelen estar muy ligados el sistema propulsivo y el de potencia (generalmente eléctrica), P&P. El motor, M, es generalmente de combustión interna, pero puede ser eléctrico, incluyendo en su caso el convertidor de energía almacenada a eléctrica, e.g. una pila de combustible, o un motor térmico generador de electricidad nuclear. El propulsor, P, ha de apoyarse en el sistema exterior (en el ambiente); puede tratarse de las ruedas del coche que se agarran al terreno, las hélices que empujan el fluido ambiente, o los chorros de escape. La propulsión hace avanzar el vehículo (o retroceder, que es lo mismo girando 180° el punto de vista). También acelerar y frenar es lo mismo en el vacío, y se necesitan los mismos sistemas propulsivos, aunque en el caso ordinario del movimiento con resistencia (fricción sólida o viscosa), acelerar siempre requiere propulsión (si no es cuesta abajo), pero frenar puede conseguirse dejando que actúe la resistencia al avance (aunque suele ser necesario acelerar la frenada en la mayoría de los casos).

Como en general los vehículos deben portar la fuente de energía (excepto los que la reciben por cable o por radiaciones), es primordial que el sistema propulsivo tenga una gran [energía específica](#) [J/kg], y una gran densidad energética [J/m³]. En términos de [exergía](#) (i.e. de trabajo, no de calor), el almacenamiento físico es muy ineficaz porque apenas almacena 0,1 MJ/kg (en las modernas ruedas giratorias, o en gases a alta presión; los supercondensadores eléctricos y los sistemas elásticos almacenan mucho menos). El almacenamiento químico y electroquímico es el preferido: las baterías recargables de Li-ion almacenan 1 MJ/kg, las pilas de combustible (incluyendo el fuel y el reformador si lo hay) pueden dar 3 MJ/kg, y los motores de combustión interna (incluyendo el combustible) suelen dar entre 10 MJ/kg los pequeños (e.g. coches) y 15 MJ/kg (grandes aviones). El almacenamiento nuclear es mucho más compacto, pero presenta

graves problemas de seguridad, y su uso es muy restringido, aunque en naves espaciales lejanas se usan pastillas de Pu-238, que dan 10^5 MJ/kg incluyendo el generador termoeléctrico ([RTG](#)).

Tipos de motor

Sobre el motor de un vehículo recae una gran parte de los aspectos de seguridad, costes de operación e impacto medioambiental, particularmente en los motores de aviación y espaciales.

El tipo de motor que convierte la energía almacenada en energía propulsiva (Fig. 1), depende del tipo de fuente y el tipo de propulsor. Ya se ha mencionado que, aunque hay propuestas de propulsión espacial nuclear para ir a Marte en poco más de un mes (e.g. [NASA-VSIMR](#)), la conversión nuclear a eléctrica y a cinética (eje o chorro) no se usa más que en los grandes navíos militares (submarinos y portaviones) donde pueden usarse pesados escudos contra las radiaciones ionizantes, y está disponible un eficiente sumidero térmico (e.g. entre los dos reactores [A1B](#) de los nuevos portaviones americanos se generan 1400 MW térmicos, que producen 260 MW propulsivos para las 4 hélices más 250 MW eléctricos, lo que implica una refrigeración con agua de mar de $1400 - 260 - 250 = 890$ MW).

Prácticamente todos los motores de más de 100 kW propulsivos usados en todo tipo de vehículos (terrestres, marinos, aéreos o espaciales) son de combustión, con la excepción de los trenes eléctricos, los de pila de combustible, y los nucleares. Los cohetes que usan electricidad para acelerar los gases de escape (normalmente ionizados para aprovechar las fuerzas electromagnéticas), aunque pueden ser unas 10 veces más eficientes en impulso específico, están muy limitados en empuje por la limitada potencia eléctrica disponible (el empuje máximo conseguido hasta 2017 en laboratorio apenas superaba los [5 N](#), con una potencia de 100 kW).

En la propulsión de coches en ciudad se están viendo cambios importantes en el tipo de sistema propulsivo, con una tendencia creciente a ir suprimiendo los sistemas de combustión en favor de los motores eléctricos. Sin embargo, en la propulsión aeroespacial no se vislumbran grandes cambios: la propulsión aeronáutica sigue basada en el aerorreactor introducido en los años 1950 (eso sí, aumentando los parámetros: relación de presiones, de temperaturas, y de flujo secundario, hasta casi duplicar el rendimiento), y la propulsión espacial sigue basada en el mismo tipo de cohetes y casi los mismos propulsores desde el primer vuelo orbital en 1957, si bien para pequeños empujes los cohetes de propulsión eléctrica están tomando la delantera (control de actitud y de órbita, compensación de la resistencia aerodinámica y la presión de radiación, vuelo en formación, atraque, empuje continuo...).

Un problema genérico de la propulsión es la variabilidad temporal de la capacidad demandada, que hace que en un coche que vaya a consumir 20 kW yendo a 100 km/h, haya que instalarle un motor de casi 100 kW, para atender a las necesidades de aceleración, de subida de pendientes, de aire acondicionado, luces, y otros accesorios (cada vez más demandados). De la misma manera, un avión debe ir equipado todo el tiempo con motores que solo trabajan al 100 % de su potencia durante los pocos minutos que dura el despegue y ascenso inicial, necesitando solo el 25 % de esa potencia para el vuelo de crucero (i.e. el consumo de combustible por unidad de tiempo en crucero es la cuarta parte del de despegue). El caso extremo se da en los vehículos lanzadores, donde la potencia necesaria decae exponencialmente con la

altura alcanzada, por lo que conviene ir tirando los tanques de combustible (incluso tirando los motores) conforme se van usando (cohetes multietapa). Este problema de picos de demanda es mucho más genérico; e.g. un piso de 100 m² en un clima templado donde vivan 4 personas puede tener un consume medio de electricidad de tan solo 0,5 kW (cociente entre los kWh facturados en un año y las 8760 horas del año), junto a un consume medio de gas de unos 1,5 kW (térmicos), mientras que en ciertos momentos se demandan picos de 5 kW o más de electricidad (e.g. vitro+horno) y 20 kW o más de gas (ducha de un individuo).

¿No se podría eliminar la combustión en los sistemas propulsivos, y almacenar la energía de frenada o cuesta abajo para acelerar o ir hacia arriba? Sí y no. Cada vez hay más coches eléctricos, y se alcanzan autonomías de unas tres horas en coches consumiendo 20 kW (a 100 km/h), aunque está por resolver todavía el largo tiempo de recarga (horas) y la escasa autonomía en invierno (la calefacción en los vehículos de combustión es gratuita). También hay soluciones eléctricas de mucha mayor potencia: hay ferris en los fiordos noruegos ‘totalmente a pilas’, con baterías de 1 MWh y motores de 1 MW, que en 10 minutos recargan para una travesía de unos 10 km a 5 m/s. Los motores de los trenes de alta velocidad pueden dar casi 10 MW, pero no transportan la fuente de energía (les llega por cable). Un avión mediano como el A320 ya casi necesita esa potencia propulsiva, y las baterías de muchos megavatios·hora pesan muchas toneladas (unos 3000 kg/MWh las mejores). El avión eléctrico que dio la vuelta al mundo en varias etapas, el [Solar Impulse 2](#), con una masa máxima al despegue de 2300 kg, llevaba 633 kg de baterías con 160 kWh de almacenamiento total, y cuatro motores eléctricos de 13 kW de potencia total. También hay motores cohete que no usan la combustión para calentar y acelerar los gases de escape, sino que usan energía eléctrica o electromagnética para acelerar los gases eyectados a velocidades mayores, pero su capacidad queda muy limitada por la energía no química disponible. Incluso la [propulsión nuclear](#) tiene sus limitaciones (no existe ningún vehículo civil que haga uso de ella, aunque un [rompehielos](#) ruso hizo algunos viajes turísticos).

En resumen, un 95 % de toda la potencia usada para la propulsión mundial (terrestre, marítima, aérea, y espacial), se obtiene por combustión de derivados del petróleo, con aire, excepto en propulsión espacial, donde el keroseno (RP1) se quema con oxígeno líquido, y se usan también otros combustibles como el hidrógeno y la [hidracina](#), y otros oxidantes como el tetróxido de dinitrógeno ([NTO](#)) o el perclorato amónico ([AP](#)).

Adónde va la energía propulsiva

La energía es conservativa, por lo que en los procesos estacionarios la energía que entra al sistema ha de salir en la misma cantidad (Primer Principio). Pero como la energía tiende a degradarse, i.e. como en su evolución tiende a disminuir su capacidad de producir trabajo (Segundo Principio), en los procesos estacionarios la energía que sale es menos útil que la que entra (sale con más entropía, con menos exergía).

En realidad, los procesos estacionarios suelen ser aproximaciones a procesos cuasi-estacionarios en los que la variación temporal es pequeña frente a los intercambios externos, y por ello puede despreciarse en primera aproximación (e.g. cuando se habla de vuelo horizontal y uniforme no se tiene en cuenta el gasto de fuel). A nivel planetario, suele considerarse que las variaciones de energía interna son despreciables frente a la radiación solar incidente. También en las máquinas suelen estudiarse los procesos estacionarios

primero, dejando para estudio posterior los procesos de arranque, de paradas, y el deterioro paulatino. Incluso en el movimiento de los vehículos suele empezarse suponiendo que el régimen de crucero es estacionario energéticamente, pese a que la energía no entra y sale (salvo en el caso excepcional de la propulsión movida por energía solar, o eólica, o gravitatoria), sino que está dentro del depósito de combustible (o dentro de los acumuladores electroquímicos), y en crucero el proceso no es estacionario sino un transitorio en el que la energía que sale proviene de la variación de masa y energía interna del vehículo (del depósito de fuel).

Volviendo a los tipos de vuelo mencionados al principio, en el ascenso aerostático de un globo o de un dirigible, la fuente de energía es gravitatoria: el aire, más pesado que el gas interior, empuja por toda la periferia con una resultante hacia arriba que lo hace subir (si no está amarrado, claro), y esa energía potencial gravitatoria va pasando a energía cinética del aerostato ascendente y a energía cinética del aire circundante que es desplazado (y acaba disipándose térmicamente por viscosidad), hasta alcanzarse la altura de equilibrio. En el desplazamiento de un dirigible propulsado por energía solar, el proceso energético es el siguiente: los paneles solares convierten una pequeña parte de la radiación solar en electricidad (hay que aislarlos térmicamente para que no calienten el gas interior y alteren la flotabilidad o las presiones); parte de la electricidad se acumula en baterías para la propulsión nocturna, y otra parte mueve los motores eléctricos que hacen girar las hélices, comunicando energía cinética al aire, y acabando toda la energía siendo disipada como energía térmica en el aire ambiente. Si la propulsión es con motor de combustión, el proceso energético es el mismo que para la propulsión del vuelo aeronáutico clásico, descrito a continuación. En cualquier caso, para el análisis energético, además de la propulsión, habrá de tenerse en cuenta el acondicionamiento térmico de los equipos y la carga de pago, pues la temperatura en altura es muy fría ($-56,5$ °C entre 11 km y 20 km según la [ISA](#), i.e. 216,65 K) y habrá que calentar para mantenerlos funcionando a unos 300 K (sin que se deterioren por el frío o el calor), y evacuar toda la energía disipada.

En la propulsión de un avión como el [A350](#), cuyos motores van consumiendo en crucero unos 2,7 kg/s de [Jet A-1](#), ¿adónde va a parar la energía del combustible (>100 MW)? El A350 puede transportar unos 350 pasajeros a Mach 0,85 (250 m/s), tiene una masa máxima de despegue de 320 t (de las que 125 t pueden ser de combustible), y cuesta 300 M€. Va propulsado por dos motores Rolls-Royce [Trent XWB](#); cada uno cuesta unos 30 M€, da un empuje máximo de 400 kN al despegue, y tiene un consumo específico de 15 (g/s)/kN en crucero (en despegue es un 10 % menor).

Nótese que para los motores (de avión o de coche) se dan diversos parámetros que no corresponden a la misma situación. Por ejemplo, de un motor de coche se puede decir que es de 100 kW y consume 4 litros de fuel cada 100 km, aunque ambos valores no puedan ocurrir a la vez, ya que para dar 100 kW de potencia motriz habría de quemar unos 300 kW de fuel, que a unos 40 MJ/kg de poder calorífico suponen $300/40=7,5$ g/s=27 kg/h, i.e. unos 33 L/h; y si solo consume 4 L a los 100 km es porque ese es el consumo en llano a unos 90 km/h, lo que corresponde a $4 \cdot 100/90=4,4$ L/h de fuel, o 3,6 kg/h (1 g/s de fuel), que a 40 MJ/kg son 40 kW de potencia térmica del fuel, que con el rendimiento térmico queda reducido a unos 13 kW de potencia motriz; en estas condiciones, estos 13 kW se disipan principalmente por fricción en la rodadura (las ruedas se calientan) y en menor proporción desplazando el aire de alrededor, mientras que los otros

40–13=27 kW de energía química disipados sin efecto motriz salen como calor al ambiente en el radiador del circuito de refrigeración del motor, y como entalpía de los gases de escape.

[Volver a Propulsión](#)